

簡易断熱試験による温度依存性を考慮した発熱速度推定に関する研究

三井住友建設(株) 正会員 ○基 哲義
 三井住友建設(株) 正会員 博(工) 樋口 正典
 三井住友建設(株) 正会員 梶 貢一
 ものつくり大学 博(工) 澤本 武博

Abstract : It is necessary to model the heating rate of concrete used for thermal analysis of concrete considering the material age and the concrete temperature which is different for each place. Also, since the heating rate varies depending on the material used, it is desirable to obtain it by a test using materials actually used. In this study, we tried estimating the heating rate by simple thermal insulation test and examined its possibility. As a result, it was found that it is possible to estimate the heat heating rate considering the temperature dependence by the simple heat thermal test which can be carried out even in the local concrete plant.

Key words : Concrete, Heat flow sensor, Heat generation characteristics, Simple thermal insulation test

1. はじめに

マスコンクリートの施工においては、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れに対して温度応力解析による事前照査が行われるが、その際に重要になるのがコンクリートの発熱特性である。コンクリートの発熱速度は、温度依存性を有するため、とくに表面からの放熱の影響を受ける内部拘束応力の解析やパイプクーリングの解析では、材齢と場所ごとに異なるコンクリート温度を考慮してモデル化する必要がある。また、厳密には使用するセメントや混和材料によっても発熱速度は異なるため、実際に使用する材料を用いた試験により求めることが望ましいと考える。本研究では、施工現場や現地の生コン工場でも比較的容易に実施できる簡易断熱試験を、水温を用いて打込み温度を変化させ、温度依存型発熱速度式を求める方法を施行し、マスコンクリートを模擬した大型供試体での温度計測結果を用いて妥当性の検証を行った。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合条件

表-1 試験に用いた配合

呼び強度 (N/mm ²)	セメントの種類 (記号)	スランプ (cm)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)	
							セメント	水
40	早強(H)	12	20	47.4	45.9	4.5	353	167
27	普通(N)	12	20	54.9	47.5	4.5	310	170
27	高炉(BB)	12	20	54.7	47.2	4.5	311	170

試験に用いたコンクリートは、下部工事などに広く使用されている普通ポルトランドセメントを用いた配合と高炉セメントB種を用いた配合、およびPC上部工事に多く使用されている早強ポルトランドセメントを用いた配合の3種類とした。普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いた配合は呼び強度27N/mm²、早強ポルトランドセメントを用いた配合は呼び強度40N/mm²のレディーミクストコンクリートを使用した。配合条件を表-1に示す。

2.2 簡易断熱試験

温度依存性を考慮したコンクリートの発熱特性を求めるために、現場や現地プラントでも比較的容易に実施できる簡易断熱試験を行い検討した。発泡スチロール製の保温型枠は図-1に示すとおり、外

径565mm, 高さ725mmの円柱状で中心部にはφ150×300mmブリキ型枠を配置した。型枠は全面が200mm断熱材で覆われる形状である。測定項目は外気温, コンクリート温度, ブリキ製型枠面での熱流束とし, 外気温およびコンクリート温度の測定にはT型熱電対を使用した。コンクリート温度の測定位置は高さ方向中央の中心部と型枠内側面部とした。中心部は熱伝導率の比較的小さなアラミドロッドを用いて固定し, 型枠内側面部はブリキ製型枠にテープで固定した。熱流束の測定には貼り付けタイプの熱流センサーを用いて専用ロガーにより測定した。熱流センサーを写真-1に示す。センサーは受感部幅10mm, 長さ54mmの薄型センサーで, 型枠外側面に熱伝導性両面テープを用いて貼り付け, 専用ロガーにより測定した。温度依存性を考慮したコンクリートの発熱特性を求めるためにはコンクリートの打込み温度を変化させる必要があるが, 現場や現地プラントでは打込み温度を変化させることは難しい。そこで比較的容易に実施できる試験を検討するため, 練り上がったコンクリートをブリキ型枠に入れ, 水温を変えた水の中に保管することでコンクリートの温度を変化させた。試験室で練り混ぜられるコンクリートの練り上がり温度は概ね20℃程度であるため, 変化させる目標温度は10℃と30℃とした。水温での保管状況を写真-2に示す。水温の調整は市販の投込み式調節機器を用いて行った。水中に浸漬後, 概ね1.5時間程度で目標とする温度に到達したので, 保温型枠内に設置して測定を開始した。

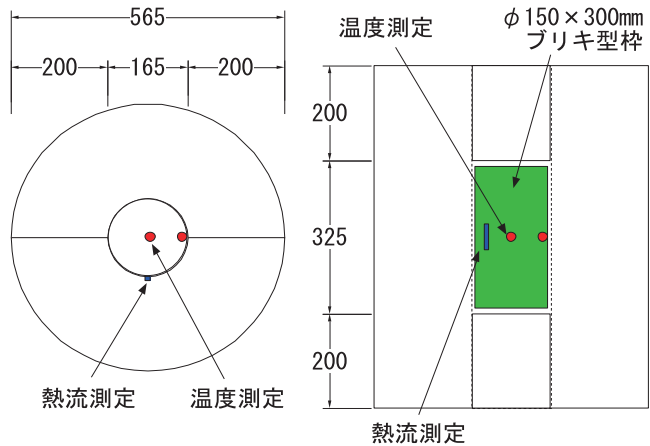


図-1 簡易断熱型枠と測定位置

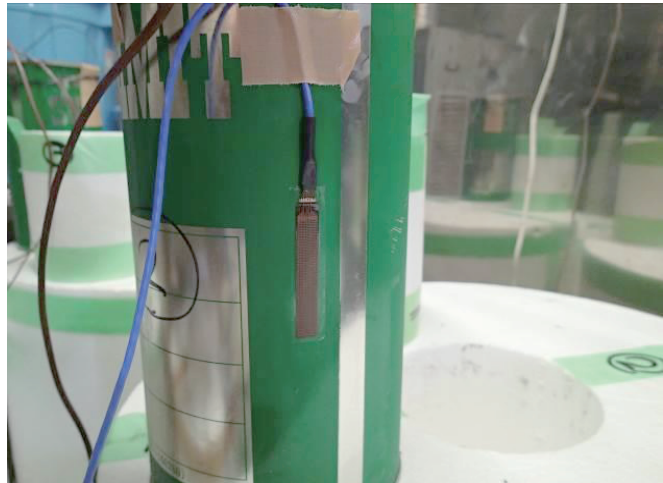


写真-1 熱流センサーの設置状況

2.3 マスコンクリート試験

マスコンクリートを模擬したブロック試験体の寸法, および計測位置を図-2に示す。ブロックは幅900mm, 奥行900mm, 高さ1200mmの約1.0m³とした。コンクリート温度の測定には簡易断熱試験と同様にT型熱電対とアラミドロッドを使用し, データロガーとパソコンを用いて計測した。計測位置は断面中央部の打設面から中心へ向かって50mm, 200mm, 600mmの位置とした。600mmの位置はブロックの中心位置となる。さらに高さ方向中央部の型枠表面から中心へ向かって50mm, 200mm位置の計5点とした。



写真-2 コンクリート温度変化

3. 簡易断熱試験

3.1 温度測定結果

コンクリートを型枠内へ打ち込んだ直後から断熱型枠に入れるまでの温度変化を図-3に示す。水中での保管開始と終了は、図中に破線で示した。すべての配合において、概ね1時間から2時間程度で目標とするコンクリート温度に到達していることが分かる。これはコンクリートの凝結過程における始発に至っていないと考えられ、影響は少ないものとする。簡易断熱試験の中心部温度と熱流の測定結果を図-4に示す。

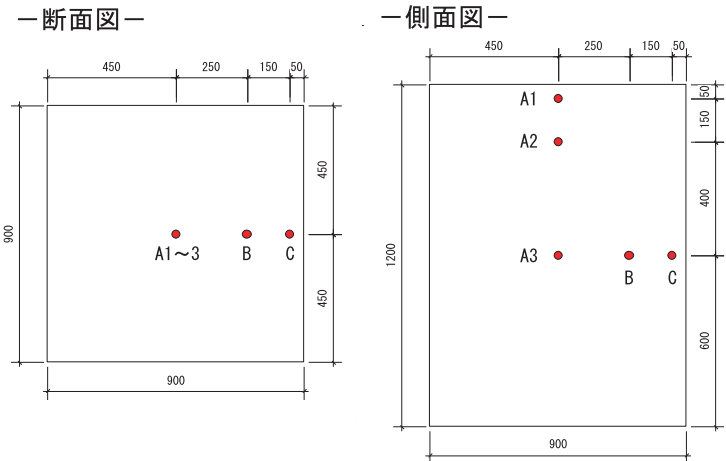


図-2 マスコンクリート型枠と温度測定位置

熱流束は供試体からの熱流出量を表すが、コンクリートの温度上昇に伴って熱流出量が大きくなっていることが分かり、コンクリート温度との相関性が確認できた。

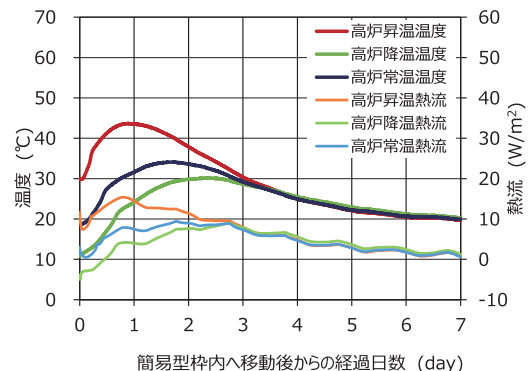
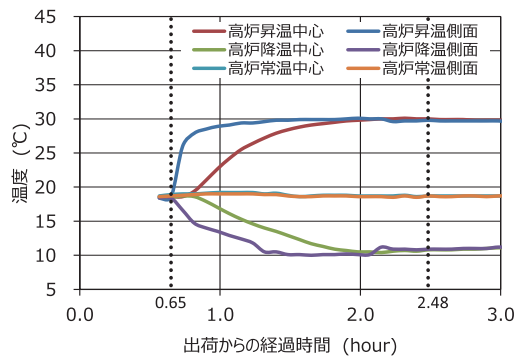
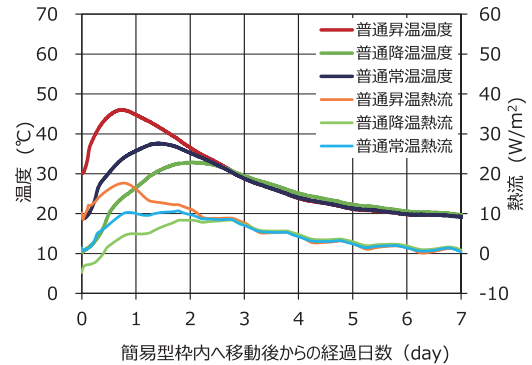
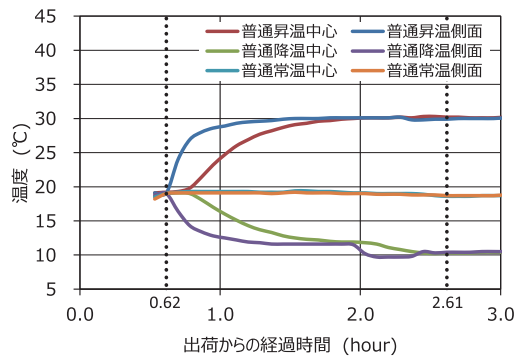
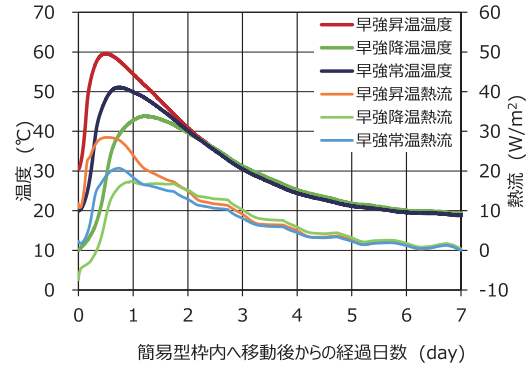
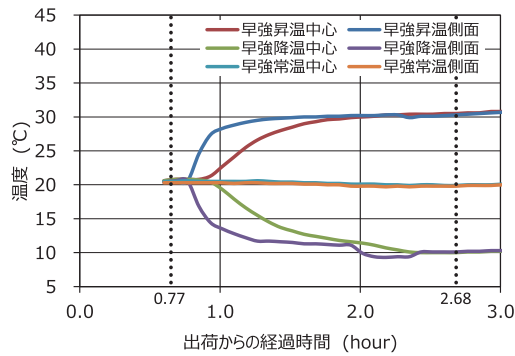


図-3 水中での温度変化

図-4 中心部コンクリート温度と熱流センサーによる測定値

3.2 温度依存型水和発熱速度式の推定

強制的に温度を変化させ、保温型枠内に打ち込んだコンクリートの測定温度に、保温型枠からの熱損失量を加算することによって断熱温度上昇量を推定した。保温型枠からの熱損失量の算出方法については、保温型枠の熱伝達率から求める方法¹⁾と、熱流センサーによって測定された熱流束から求める方法の2種類とした。なお、コンクリートの中心と表面の温度差は非常に小さいことから、供試体内での熱伝導は無視した。保温型枠の熱伝達率については、試験終了後の供試体を乾燥器で80℃まで加熱し、20℃の恒温室内に設置された保温型枠内での温度降下を測定することによって求めた。

コンクリート温度と熱損失量より求められた、各温度による断熱温度上昇量を用いて、式(1)で表される温度依存型水和発熱速度式²⁾における Q と $-E/R$ の関係と Q と $\log H_{\infty}$ の関係を求めた。

$$\log H = \log H_{\infty}(Q) - \frac{E(Q)}{R} \left[\frac{1}{T} \right] \quad (1)$$

ここに、 Q ：積算発熱量， H_{∞} ：限界水和発熱速度， $-E/R$ ：セメントの温度活性

各配合における Q と $-E/R$ の関係を図-5に、 Q と $\log H_{\infty}$ の関係を図-6に示す。早強ポルトランドセメントを用いた配合では、熱伝達率と熱流束より求めた結果が比較的一致したが、普通ポルトランドセメントを用いた配合では差が生じ、高炉セメントB種を用いた配合ではさらに差が大きくなる傾向を示し

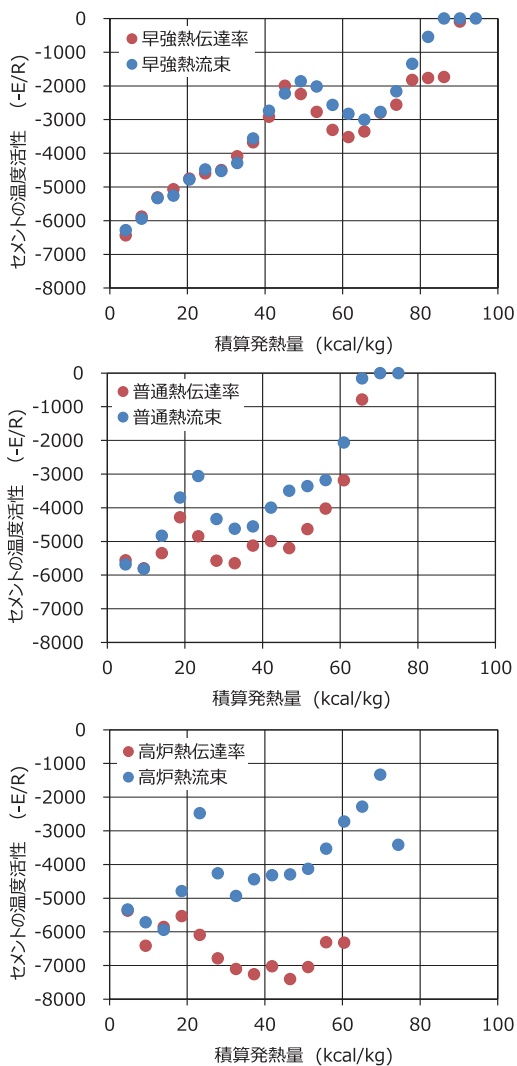


図-5 セメントの温度活性と積算発熱量の関係

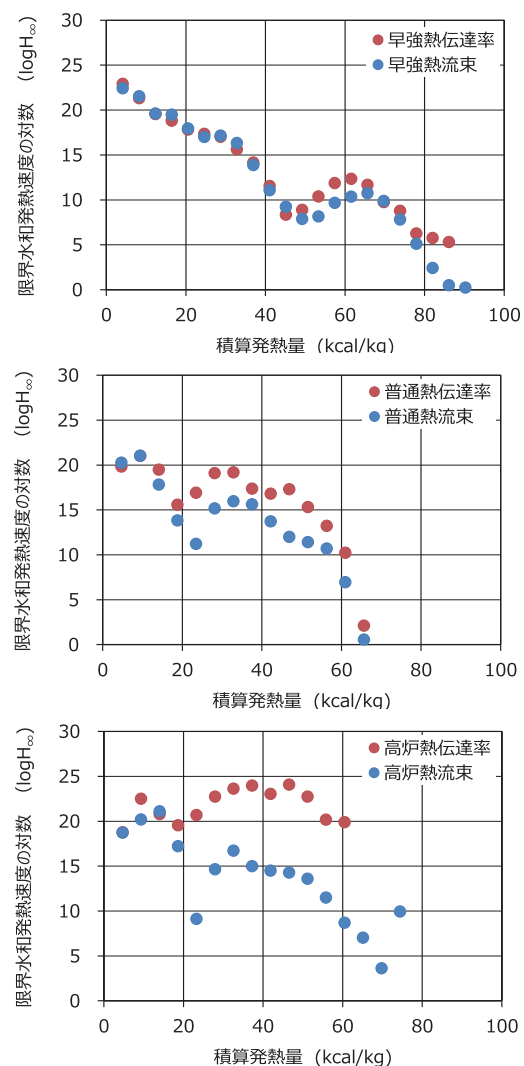


図-6 限界水和発熱速度の対数と積算発熱量の関係

た。熱流束については実際の熱の移動を計測しているものであり、これを正とすれば熱伝達率から求めた結果が正しくないことになる。熱伝達率は置かれる環境によっても異なることから、試験時の熱伝達率が変化し、放熱の影響を受けやすく、比較的発熱速度が遅い高炉セメントB種で差異が大きくなったことが考えられる。

4. 温度依存型水和発熱速度式の検証試験

4.1 解析条件

汎用の温度応力解析専用プログラムを使用し、簡易断熱試験の熱流束により求めた温度依存型水和発熱速度式の検証を行った。コンクリートの熱物性値を表-2に示す。

表-2 解析条件

呼び強度 (N/mm ²)	セメントの種類	コンクリートの密度 ρ (kg/m ³)	コンクリートの比熱 c _c (kJ/kg°C)	コンクリートの熱伝導率 λ (W/m°C)	型枠の熱伝達率 h (W/m ² °C)	打設面の熱伝達率 h (W/m ² °C)
40	早強	2330	1.30	2.30	5.0	7.0
27	普通	2321	1.31	2.30	5.0	7.0
27	高炉	2310	1.31	2.30	5.0	7.0

密度ρは配合値とし、比熱c_cはコンクリート標準示方書に示されている式(2)を用いて密度より算出した。熱伝導率λは、中心部に熱電対を埋め込んだφ150×300mmの円柱供試体を50°Cの温水中で一様に温めた後に20°Cの水槽に移し、時間経過とともに低下する供試体中心温度を計測して求めた。型枠と打設面の熱伝達率hについては、事前試験により求める事が困難であったため、型枠と打設面近傍の測定データと逆解析結果が比較的合う値を求めた。

$$c_c = 3.03 \times 10^3 / \rho \tag{2}$$

4.2 逆解析による検証

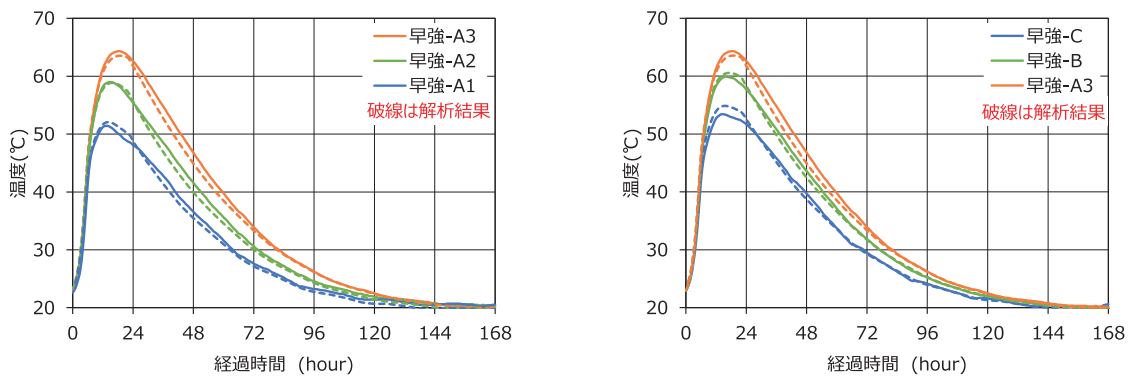


図-6 早強配合の温度測定結果と解析結果

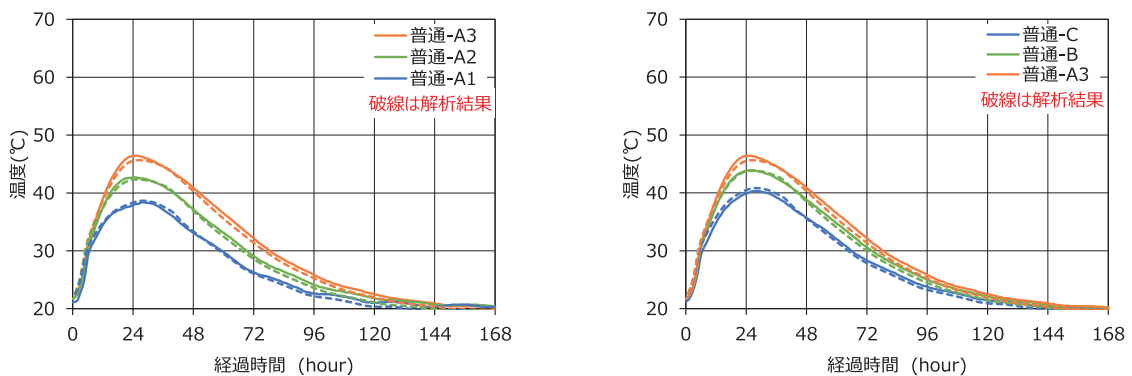


図-7 普通配合の温度測定結果と解析結果

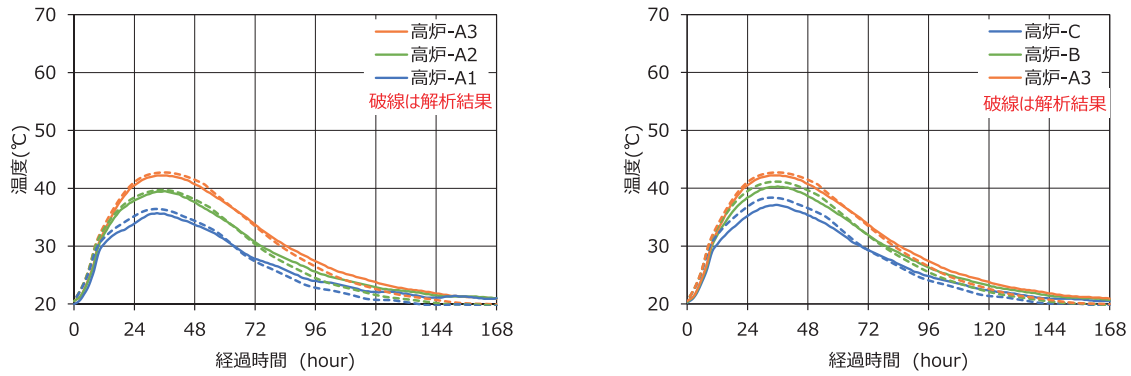


図-8 高炉配合の温度測定結果と解析結果

図-2に示す温度計測位置における実測値と解析値の比較を図-6, 7, 8に、各測定点での最高温度の差を表-3に示す。解析に使用した Q と $-E/R$ の関係と Q と $\log H_{\infty}$ の関係は熱流センサーにより求めた結果を用いた。これらの結果から、温度の上下降勾配が実測値と良く合っていることが分かる。コンクリートの最大温度においても $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以下となり精度良く解析できていることが分かる。

表-3 各測定点での温度差 単位: $^{\circ}\text{C}$

配合	A1	A2	A3	B	C
早強	-0.7	0.1	0.8	-0.6	-1.5
普通	-0.3	0.4	0.7	0.1	-0.5
高炉	-0.7	-0.2	-0.5	-0.8	-1.3

5. まとめ

今回行った試験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 保温型枠を用いた簡易断熱試験において、放熱による熱損失量を求める方法として、保温型枠の熱伝達率を用いて求める方法と、熱流センサーによって測定される熱流束から求める方法を比較した。その結果、早強ポルトランドセメントを用いた配合では比較的一致したもの、普通ポルトランドセメントを用いた配合では差が生じ、比較的発熱速度が遅い高炉セメントB種を用いた配合ではさらに差が大きくなる傾向を示した。このことから、保温型枠の熱伝達率が正しく評価できていないことも考えられ、熱損失量は熱流センサーによって直接測定される熱流束を用いて求める方が良い。また、このことによって保温型枠の熱伝達率試験も不要となる。
- 2) 打込み温度については、練り上がったコンクリートを温水や冷水中で加温、冷却することによって模擬したが、今回の供試体のサイズであれば概ね1時間から2時間程度で目標とするコンクリート温度に到達しており、凝結過程における始発にも至っていないと考えられることから影響は少ないものとする。
- 3) マスコンクリートを模擬した大型供試体での検証試験の結果、実測値と解析値は最大温度で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内、上下降勾配も良く一致し、熱流センサーを用いた簡易断熱試験によって温度依存性を考慮した発熱速度が推定可能であることが検証できた。
- 4) 今回試行した熱流センサーを用いた簡易断熱試験は、保温型枠と汎用的な機器のみで実施可能であり、施工現場や現地の生コン工場においても十分に実施できるものとする。

参考文献

- 1) 葛西康幸, 河野広隆, 渡辺博志: 簡易な断熱試験による高強度コンクリートの断熱温度上昇特性に関する検討, 土木学会第57回年次学術講演会, V-584, pp. 1167-1168, 平成14年
- 2) 鈴木康範, 辻 幸和, 前川宏一, 岡村 甫: コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集, No. 414, V-12, pp. 155-164, 1990.2